



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## SVAŘOVÁNÍ OCELI C45

WELDING OF STEEL C45

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kamil Hála

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2017

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Kamil Hála**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubíček**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Svařování oceli C45

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařování vysokouhlíkové oceli je náročné z hlediska teplotních poměrů ve svarovém spoji i kalitelnosti oceli s 0,5% uhlíku. Práce řeší možnosti svařování spoje tenkostěnných profilů při různých podmínkách a metodách.

### Cíle bakalářské práce:

1. Zhodnotit současný stav svařování dané součásti.
2. Vypracovat literární studii možných technologií svařování.
3. Vyhodnotit parametry a podmínky svařování, které mají vliv na svařitelnost materiálu.
4. Navrhnout parametry pro experimentální ověření svařitelnosti.
5. Provést a vyhodnotit experiment.
6. Závěr.

### Seznam literatury:

DVOŘÁK, Milan. a kol. Technologie II, 2vyd. CERM Brno, 2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7

PILOUS, Václav. Materiály a jejich chování při svařování, 1vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009

BARTÁK, J. Výroba a aplikované inženýrství, 1vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1vyd. ETERNA PRESS s.r.o. Bratislava 2003, ISBN 80-968359-5-5

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

HÁLA Kamil – Svařování oceli C45

Cílem této bakalářské práce je navržení vhodných parametrů pro svařování malé součásti z oceli C45, která se vyznačuje vysokým obsahem uhlíku a je tudíž špatně svařitelná. Při výběru vhodného způsobu výroby byly uvažovány technologie svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře, z nichž se jako nejvýhodnější jeví metoda TIG. Pro tuto metodu byly navrženy 3 skupiny parametrů, ze kterých byl vybrán parametr nejvhodnější pro výrobu. Jedná se o skupinu se svařovacím proudem  $I=40$  A a s předehřevem 200 °C. Součást je vyráběna v kusové výrobě firmou SAAB Czech s.r.o.

Klíčová slova: ocel C45, svařování, TIG, elektrický oblouk, struktura materiálu

## **ABSTRACT**

HÁLA Kamil – Welding of steel C45

The aim of this bachelor's thesis is to propose a suitable welding parameters for a small part of steel C45. This steel contains a high percentage of carbon and therefore is difficult to weld. Gas shielded arc welding techniques were considered to be used, and from such techniques, the TIG method seems to be the most advantageous one. For this technique were suggested three groups of parameters and the most suitable one was chosen to be used for the production. The option chosen is of a welding power  $I=40$  A and with preheating 200 °C. The component is made in the single-part production in SAAB Czech s.r.o.

Keywords: Steel C45, welding, TIG, electric arc, material structure

## **Bibliografická citace**

HÁLA, Kamil. *Svařování oceli C45*. Brno, 2017. 33s, 1 výkres, 2 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Svařování oceli C45** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Kamil Hála

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné rady a připomínky a také za čas, který mi při vypracování věnoval. Rovněž bych rád poděkoval firmě Saab Czech s.r.o. za poskytnutí zadání. Dále také rodině a dalším, kteří mi pomohli při vypracování bakalářské práce.

## Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod .....	9
1 Rozbor zadání.....	10
2 Technologie svařování elektrickým obloukem .....	11
2.1 Elektrický oblouk .....	11
2.2 Statické voltampérové charakteristiky el. oblouku .....	12
2.3 Dynamická voltampérová charakteristika el. oblouku .....	12
2.4 Metody svařování elektrickým obloukem .....	13
2.4.1 MIG/MAG.....	13
2.4.2 WIG/TIG .....	14
2.5 Přídavné materiály.....	15
2.6 Svařovací zdroje .....	15
2.7 Přenos kovu v oblouku .....	17
2.8 Elektrody pro svařování metodou TIG.....	19
2.9 Metalurgické děje .....	19
2.10 Tepelně ovlivněná oblast (TOO) .....	20
3 Experimentální část .....	22
3.1 Technologičnost součásti .....	22
3.2 Rozbor materiálu 12 050 (C45).....	22
3.3 Uhlíkový ekvivalent .....	23
3.4 Teplota předehřevu.....	23
3.5 Příprava metalografického vzorku .....	23
3.6 Vyhodnocení svařovaných vzorků .....	25
4 Závěr.....	33

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh



## Úvod [4], [5], [9]

Svařováním vznikají pevná a nerozebíratelná spojení strojních částí, ale i celých konstrukcí, které jsou složeny z několika menších součástí. V dnešní době se svařování využívá téměř ve všech odděleních strojího průmyslu, zejména pak automobilový, letecký a lodní průmysl. Běžně k výrobě tlakových nádob a rozměrných ocelových konstrukcí, přestože svary lze považovat iniciátory trhlin, které mohou způsobit vážné havárie. Při návrhu svarových konstrukcí je pozornost věnována volbě vhodné technologie a materiálu vzhledem k předpokládanému zatížení konstrukce.

Při svařování tenkých plechů je důležité dbát na správnou přípravu výroby z důvodů vyšších nároků na přesnost. Musíme počítat s velkým tepelným ovlivněním základního materiálu a s tím spojenou změnu struktury a velké tepelné ovlivnění, které způsobuje deformace základního materiálu. Velikost deformací a vzhled svaru je ovlivněn volbou technologie svařování.

V této závěrečné práci se zaměříme na svar malé součásti z plechu, vyrobeného z oceli 12 050 (C45), která se vyznačuje obtížnou svařitelností zapříčiněnou vyšším obsahem uhlíku. Zaměříme se na porovnání technologií svařování a vybereme nejvhodnější z nich, kterou budeme součást svařovat. V experimentální části provedeme analýzu svařované oblasti, vliv předehřevu a zhodnotíme výslednou strukturu vzniklou v oblasti svaru.



Obr. 1 Svařování malých součástí [25]



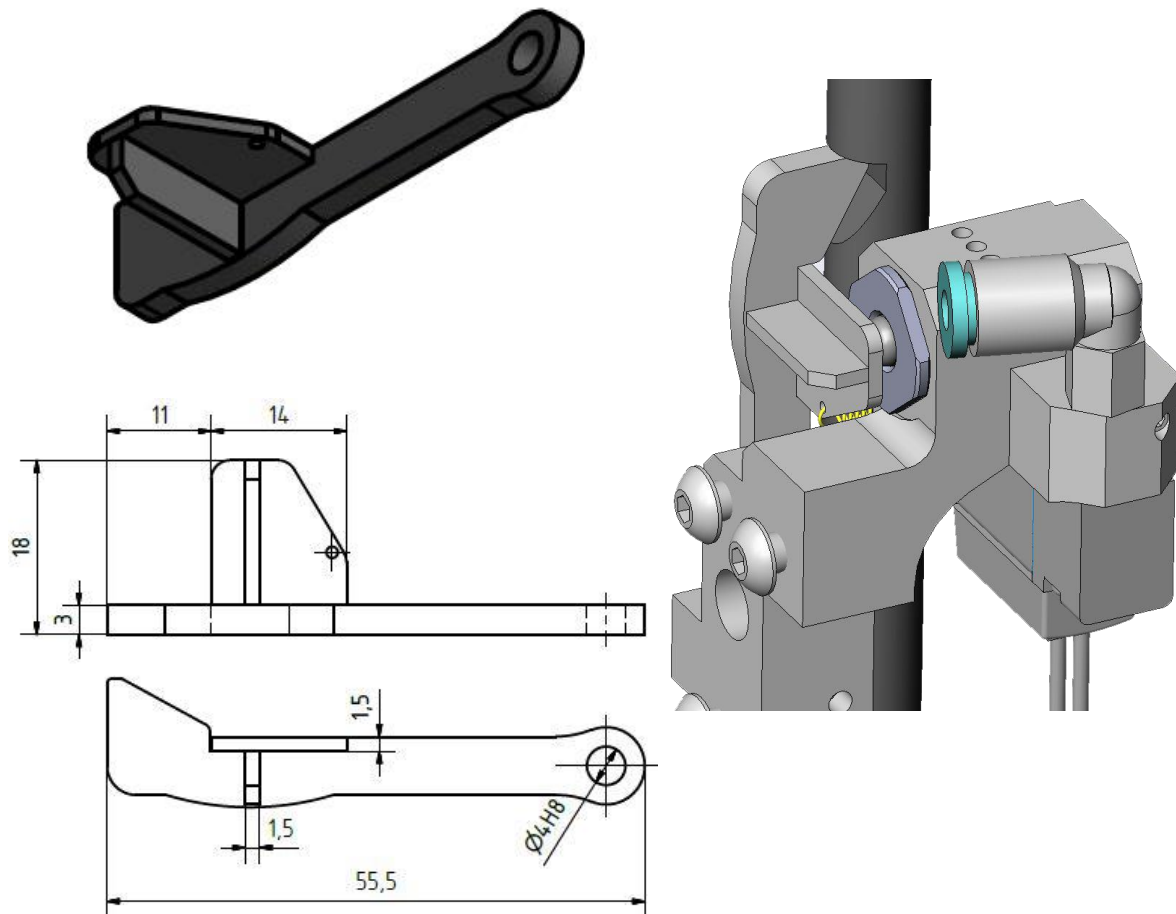
Obr. 2 Svařování metodou TIG [26]

## 1 Rozbor zadání

Vyráběná součást je jeden z prvků ovládání vzduchotechniky v simulátorech zpětného rázu střelných zbraní. Jedná se o táhlo, při jehož použití vznikne síla  $F(t)$ , která působí proti pružině. Tím se uvolní kulička v dalším prvku a dojde k přesměrování proudu vzduchu. V momentě, kdy se táhlo vrátí do původní polohy, pružina zatlačí kuličku zpět, čímž se vrátí směr proudu vzduchu.

Součást je vyrobena z oceli ČSN 41 2050 (dále jen ocel C45), která je dodávána v podobě plechu. Z tohoto polotovaru je poté pomocí vodního paprsku nebo laseru vypálen tvar součástí. Celkem se jedná o 2 součásti tloušťky 1,5 mm a jednu součást o tloušťce 3 mm. Tyto součásti jsou k sobě přivařeny koutovým svarem metodou TIG. Z konstrukčních důvodů není možné použít jiný materiál, který by byl lépe svařitelný.

Celkem byly vyrobeny 4 součásti za různých podmínek. V rámci experimentální části se zaměříme na změny struktury ve svaru, tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a popíšeme vady jak ve svaru, tak na jeho povrchu.



Obr. 3 Vyráběná součást

Obr. 4 Umístění součásti v mechanismu

Obr. 5 Rozměry součásti

## 2 Technologie svařování elektrickým obloukem [4], [5]

Svařování elektrickým obloukem náleží mezi metody tavného svařování, vykonává se místním natavením spojovaných částí bez použití tlaku. Po ztuhnutí nataveného kovu vznikne pevný nerozebíratelný spoj. Potřebná energie pro vytvoření svarového spoje je přivedena do oblasti svarů pomocí silného energetického výboje v plynu (elektrický oblouk).

### 2.1 Elektrický oblouk [4], [5], [6], [20]

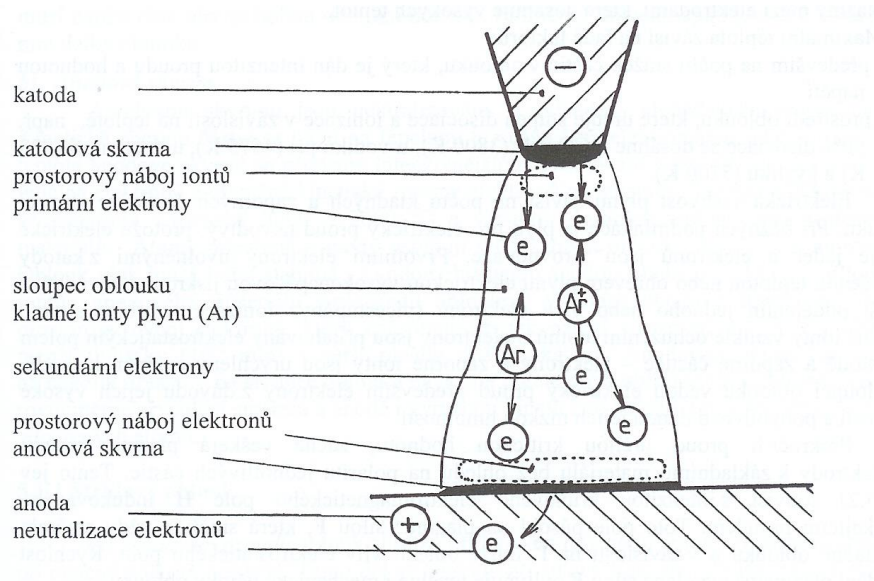
Hlavním prvkem tohoto typu svařování je elektrický oblouk, který hoří v ionizovaném plynném prostředí mezi elektrodami. Jedná se o vysokotlaký, nízkonapěťový elektrický výboj, který je charakterizován malým katodovým úbytkem, velkým proudem a nízkým napětím. Dále intenzivně vyzařuje světlo, teplo a ultrafialové záření.

K udržení stálého elektrického oblouku je potřeba nepřetržitá ionizace prostředí mezi elektrodami. K ionizaci prostředí dochází prostřednictvím elektronů odpoutaných z povrchu katody, které se postupně srážejí s molekulami par a plynů v oblasti elektrického oblouku. Počet uvolněných elektronů a jejich kinetická energie roste rovnoměrně se zvyšujícím se napětím na elektrodách.

Elektrický oblouk se skládá ze tří částí:

- Katodová skvrna – emituje prvotní elektrony, které jsou důležité pro zapálení oblouku a ionizaci plynného prostředí. Teplota skvrny se pohybuje okolo 2 600 °C.
- Anodová skvrna – neutralizuje a odvádí dopadající záporné částice. Teplota skvrny se pohybuje okolo 3 000 °C.
- Sloupec oblouku – oblast ionizovaného a disociovaného plynu, která vyzařuje silné světelné záření a dosahuje teplot okolo 4 000 až 7 000 °C.

U běžného svařování se setkáváme se svařovacím proudem  $I=10\text{--}2\,000\text{ A}$ , a napětím v oblouku v rozmezí  $U=10\text{--}60\text{ V}$ .

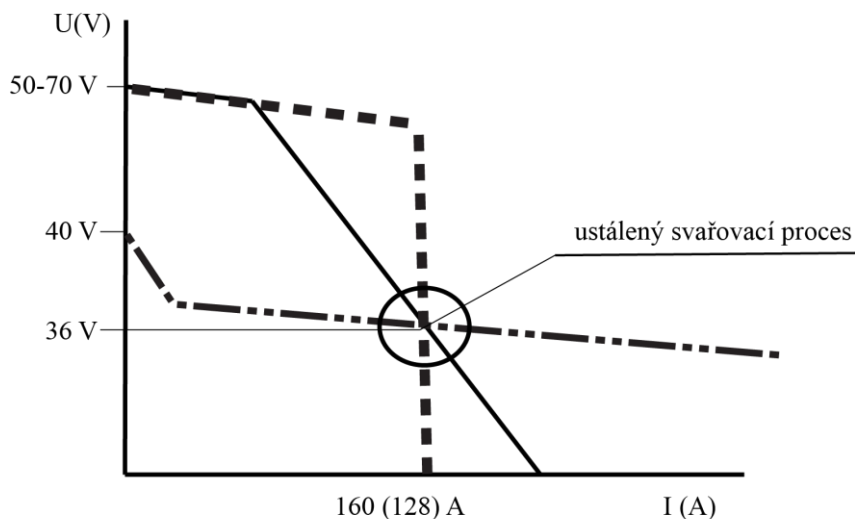


Obr. 6 Znáznornění elektrického oblouku [6]

## 2.2 Statické voltampérové charakteristiky el. oblouku [4], [20]

Statická voltampérová charakteristika ovlivňuje vhodnost zdroje elektrického proudu ke svařování. Zobrazuje závislost proudu a svorkového napětí zdroje v ustáleném stavu, při určitém regulačním stupni zdroje.

- Strmá – s konstantním proudem, vhodná pro ruční svařování obalenou elektrodou
- Polostrmá – mírně klesající s konstantním výkonem
- Plochá – s konstantním výkonem, vhodná pro mechanizované svařování (například pomocí CO<sub>2</sub>)

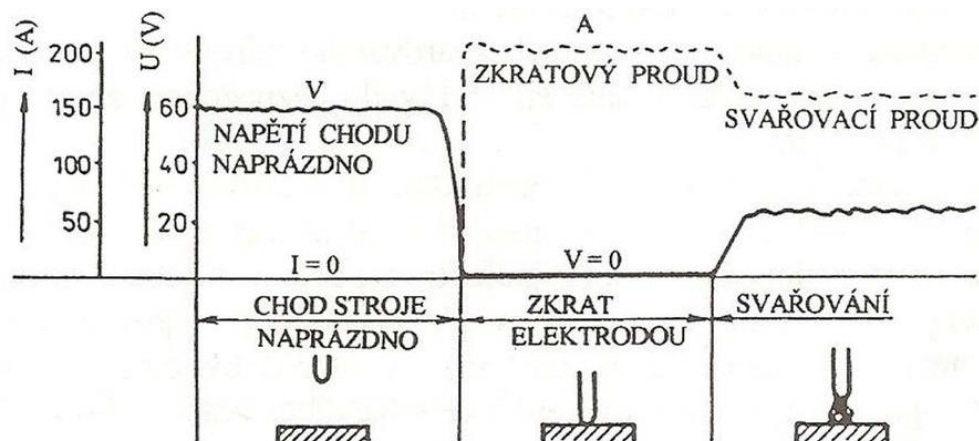


- strmá charakteristika
- polostrmá charakteristika
- · - · - · - plochá charakteristika

Obr. 7 Statické charakteristiky elektrického oblouku [17]

## 2.3 Dynamická voltampérová charakteristika el. oblouku [4], [20]

Popisuje schopnost zdroje elektrického proudu vyrovnávat náhlé krátkodobé změny napětí při zapálení, zkratu a přerušení elektrického oblouku. Tyto změny lze oscilograficky zaznamenávat a z oscilogramů lze dynamické charakteristiky vyhodnotit.



Obr. 8 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku [1]

## 2.4 Metody svařování elektrickým obloukem

### 2.4.1 MIG/MAG [3], [6], [8], [16]

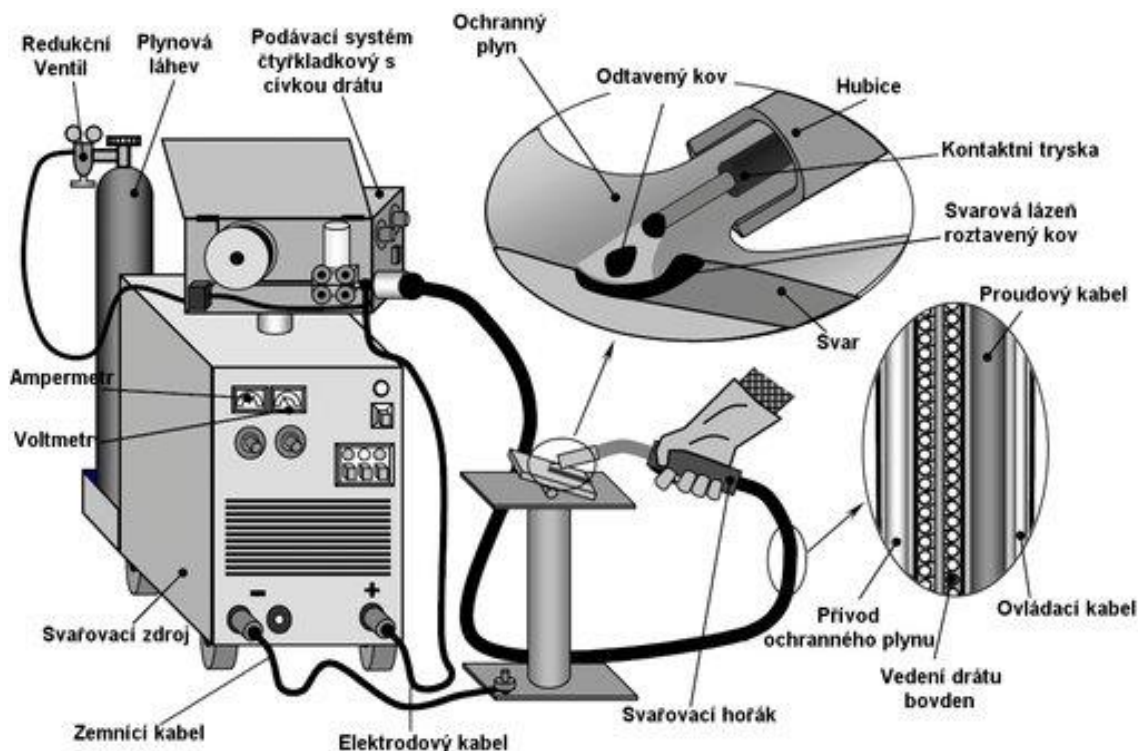
Jedná se o obloukovou metodu svařování tavící se elektrodou, při kterém je oblast svaru chráněna ochranným plynem. Elektrický oblouk hoří mezi kontinuálně podávaným drátem (elektroda) a svařovanou součástí. Ochranná atmosféra je zaručena výhradně externím zdrojem v podobě tlakových lahví. Popřípadě lze využít speciální trubičkové (plněné) dráty jejichž obsah se vlivem teploty elektrického oblouku odpařuje a vytváří ochranou atmosféru. Tyto plyny spolehlivě chrání svar i při průvanu.

Dle dodávaného plynu se tato metoda rozděluje na MIG (Metal InertGas), jedná se o metodu, která využívá inertní plyn, který nereaguje s roztavenou lázní. Nejčastěji argon a helium. A na metodu MAG (Metal ActiveGas). Tato metoda na rozdíl od metody MIG využívá aktivní plyny jako jsou  $\text{CO}_2$  nebo  $\text{O}_2$ , které reagují s roztavenou lázní. V současné době jsou velmi rozšířeny směsi argonu s oxidem uhličitým.

Složení a množství ochranného plynu ovlivňuje metalurgické děje při přenosu kovu z elektrody, síly působící v oblouku, tvar a rozměry oblouku, charakter přenosu kovu v oblouku, tvar a rozměry průřezu svaru. Ochranné plyny mají také vliv na celkovou kvalitu svarového spoje. Označení jednotlivých směsí je dáno normou ČSN EN439.

Metody MIG a MAG využíváme u nízce i vysoce legovaných ocelí, nerezových ocelí, u slitin hliníku a mědi.

- Výhody: možnost svařovat ve všech polohách, vysoká produktivita díky vysoké svařovací rychlosti, jasně viditelný oblouk a svarová lázeň, nízká tvorba strusky, malá tepelně ovlivněná oblast
- Nevýhody: vyšší pořizovací cena zdroje, vyšší nároky na údržbu, riziko odfouknutí ochranné atmosféry



Obr. 9 Znáznornění MIG/MAG pracoviště [8]



## 2.4.2 WIG/TIG [3], [6], [8], [16]

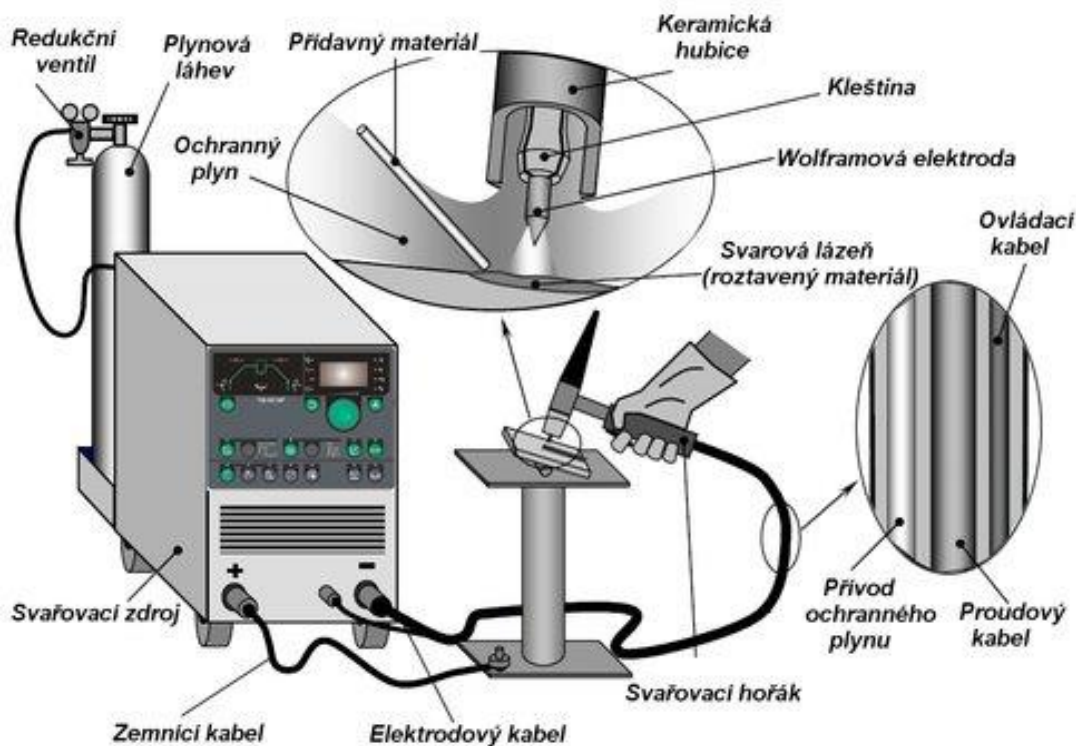
Elektrický oblouk hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a svařovanou součástí. Oblast svaru je vždy chráněna inertním plynem, který se přivádí skrz trysku okolo wolframové elektrody. V případě potřeby je přidávaný materiál v podobě „studeného drátu“ přiváděn buď ručně, nebo mechanicky prostřednictvím podavače.

Nejpoužívanějším plynem pro tento způsob svařování je argon, který zaručuje stabilitu oblouku a vytváří lepší čistící zóny než helium. Na druhou stranu helium zaručuje hluboký a široký závar díky vyšší tepelné vodivosti. Při svařování austenitických ocelí se používá směs argonu a vodíku, přičemž vodík tvoří 2-5 % této směsi.

Metoda TIG se hojně používá v lodním, elektrárenském, petrochemickém a potravinářském průmyslu. Je vhodná jak pro ruční, tak i mechanizované svařování. Mezi hlavní svařované materiály patří nerezové oceli, slitiny hliníku a niklu.

Rozdíl mezi metodami TIG a WIG je pouze v jejich názvu. Wolfram nese v angličtině název tungsten a odtud pramení zkratka TIG (Tungsten Inert Gas).

Hlavní parametry jsou délka oblouku (obvykle 2 až 5 mm), tepelný příkon a rychlost svařování.



Obr. 10 Znáznornění TIG/WIG pracoviště [8]

## 2.5 Přídavné materiály [6], [12], [13]

- Přídavný materiál pro svařování metodou MIG/MAG je dodáván v podobě plného drátu či plněné trubičky, které obsahují například legující, rafinační a dezoxidační prvky. Plné dráty se vyrábí převážně tažením za studena na požadované průměry, které se pohybují od 0,6 do 1,6 mm. Plněné dráty se vyrábí svinováním z plechů z nízkouhlíkové oceli. Tyto trubičky jsou naplněny struskotvornými přísadami, legujícími prvky, dezoxidačními přísadami a tavidly.

Přídavný materiál je pomocí podavače přiváděn do oblasti, ve které hoří elektrický oblouk, kde se taví a přenáší do svarové lázně.

Každý svařovaný materiál má své specifické požadavky na složení přídavného materiálu.



Obr. 11 Svařovací drát MIG/MAG (OK Aristorod 13.12) [12]

- Pro metodu WIG/TIG se jako přídavný materiál používají svařovací dráty, pro automatizované svařování, a svařovací tyčinky pro svařování ruční. Přidává se na přední okraj svarové lázně. U této metody plní funkci legující, dezoxidační, zlepšuje formování svaru, doplňuje objem svarového kovu a vytváří svar o požadovaném tvaru.

Svařovací tyčinky se vyrábí v průměrech 1 až 8 mm o délce 600 až 1 000 mm. Používají se pro ruční svařování, kde se ručně zavádí do oblasti, ve které hoří elektrický oblouk. Je důležité dbát na to, aby přídavný materiál neopustil ochrannou atmosféru, tím by došlo k nežádoucí oxidaci svarové lázně.



Svařovací dráty se používají pro mechanizované strojní svařování. Jedná se o dráty přesného kruhového průřezu o průměru 0,6 až 2,4 mm (pro navařování až 5 mm). Dodávají se navinuté na cívkách a základním materiálem pro výrobu je měď, hliník a jejich slitiny. Podmínkou je střední stupeň tvrdosti po deformačním zpevnění.

Obr. 12 Svařovací drát WIG/TIG (OK Tigrod 12.61) [13]

## 2.6 Svařovací zdroje [3], [6], [22]

Umožňují změnu hodnot síťových napětí a proudů na hodnoty, které umožňují udržení rovnoměrného a stabilního elektrického oblouku. Základní rozdělení zdrojů rozlišuje zdroje střídavého proudu (transformátory) a zdroje stejnosměrného proudu, které se dále dělí na točivé (dynama) a netočivé (měniče, usměrňovače).

- Metoda MIG/MAG pracuje se zdrojem stejnosměrného proudu s plochou statickou charakteristikou, přičemž kladný pól představuje svařovací drát. Zdroj je vybaven transformátorem s řadou přepínatelných odboček, které umožňují nastavit požadovanou hodnotu svařovacího proudu. O přeměnu střídavého proudu na stejnosměrný se stará usměrňovač zařazený za transformátorem.



V současnosti se nejčastěji používají inverterové svařovací zdroje. Tyto zdroje vyrábějí ze síťového napětí pulzní napětí o vysoké frekvenci. Vlivem napětí o vysoké frekvenci se snižují rozměry a hmotnost transformátoru. Inverterové zdroje se vyznačují plynule nastavitelným výstupním proudem, který je trvale udržovaný v oblasti ideálních podmínek.

Součástí zdroje bývá také podavač přídavného materiálu, který může být externí nebo vestavěný do krytu svařovacího zdroje. Rychlost podávání drátu spolu s regulací napětí určují svařovací výkon.

Obr. 13 Svařovací inverter MIG/MAG [24]

- WIG/TIG pracuje jak se stejnosměrným, tak i se střídavým zdrojem elektrického proudu. Stejnosměrné zdroje jsou zaměřeny převážně na svařování ocelí, mědi, titanu a jejich slitin. Kdežto střídavé zdroje nacházejí uplatnění při svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin.

Podobně jako u metody MIG/MAG jsou dnes nejrozšířenější inverterové zdroje, které mají výborné svařovací charakteristiky, vysoký výkon a malé rozměry. Dále mohou být vybaveny regulací dodávky ochranného plynu, funkcemi pro dvoutaktní nebo čtyřtaktní svařování, bezdotykovým zapalováním oblouku a řízením dotváření kráteru na konci svarové housenky.

Zdroje musí být schopny dodat neměnný proud o předem stanovené hodnotě.



Obr. 14 Svařovací inverter Picotig 180 [14]

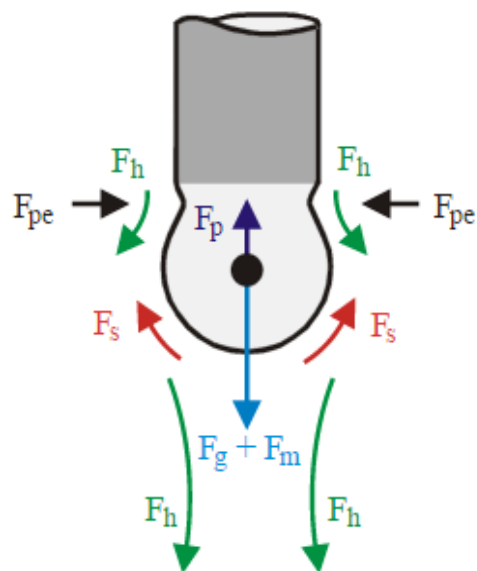


## 2.7 Přenos kovu v oblouku [6], [20]

Způsob přenosu kovu v elektrickém oblouku je jednou ze základních charakteristik svařování tavicí se elektrodou. Závisí na svařovacích parametrech, druhu přídavného materiálu, technice svařování a ochranné atmosféře. Jedná se o proces, při kterém dochází k odtavení přídavného materiálu, který se v podobě malých kapiček dostává do svarové lázně, kde se mísí se základním svařovaným materiálem.

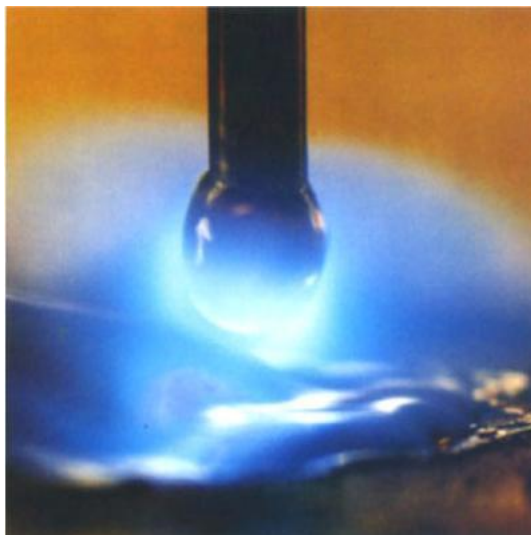
Síly působící na odtavený kov při metodě MIG/MAG:

- $F_s$  – síla povrchového napětí, udržuje tvar kapky s nejnižší povrchovou energií
- $F_p$  – tlak odpařovaných kovů z elektrody, má brzdicí účinek na elektrony
- $F_g$  – gravitační síla, je relativně malá a nemá přímý vliv na směr pohybu kapky
- $F_m$  – elektromagnetická síla, roste společně se zmenšujícím se krčkem ohřátého konce elektrody a má zásadní vliv na oddělení kapky a přenos kovu do lázně
- $F_h$  – hydrodynamická síla, vzniká vlivem vysoké rychlosti proudícího plazmatu, nejvíce se projeví při sprchovém přenosu
- $F_{pe}$  – pinch efekt, vzniká jako radiální složka elektromagnetického pole, podílí se na tvorbě krčku



Obr. 15 Systém oddělení kapky [15]

- Krátký zkratový oblouk – vlivem oddělování kapky vzniká krátkodobý zkrat, vlivem kterého dojde ke krátkému zhasnutí elektrického oblouku. Tím dojde ke zvýšení teploty, utrnutí kapky, a po jejím dopadu do svarové lázně se opět zapálí oblouk. Napětí u tohoto přenosu se pohybuje v rozmezí od 14 do 22 V a svařovací proud v rozsahu od 60 do 180 A. Frekvence zkratů a opětovného zapálení oblouku se pohybuje od 20 do 200 Hz. S rostoucím napětím klesá frekvence zkratů a dochází k většímu rozstříku kovu do okolí. Tento typ přenosu je vhodný zejména pro slabé materiály a pro vyvařování kořene. Modifikací je zrychlený zkratový přenos, kterého je dosaženo zvýšením svařovacího proudu nad 200 A. S tím souvisí i vyšší rychlosti podávání přídavného materiálu a vyšší výkony svařování.



Obr. 16 Krátký zkratový oblouk [20]

- Přechodový oblouk – přídavný materiál se nataví do větší kapky, která je častokrát větší než průměr přídavného materiálu. Tento jev je dán vyšším svařovacím proudem, který se pohybuje v rozmezí od 190 do 300 A. Použité napětí nabývá hodnot od 22 do 28 V. Frekvence uvolňování kapek je poměrně malá, pouze 5 až 40 Hz. Tento typ přenosu je možné použít pro svařování středně silných plechů nebo při bodování silných plechů. Postupem času se od něj ustupuje z důvodu velkého rozstříku a hrubé svarové housenky.



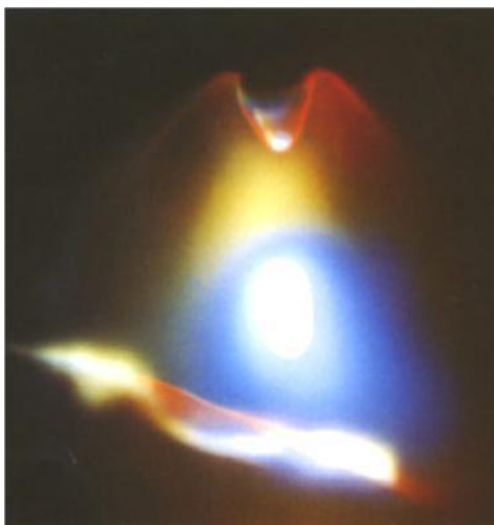
Obr. 17 Přechodový oblouk [20]

- Sprchový oblouk – vzniká při vysoké ionizaci argonu ke které dochází vlivem vysokého svařovacího proudu, který dostahuje hodnot od 200 do 500 A, a napětí 28 až 40 V. Tvoří se drobné kapky, které jsou vlivem magnetického pole ustříženy a osově urychleny směrem do tavné lázně. Kapky se tvoří ve vysoké frekvenci 150 až 350 Hz. Při oddělení kapky nedojde k přerušení elektrického oblouku a dochází k velkému přenosu tepla do základního materiálu. Tím vzniká hluboký závar, který roste lineárně s hodnotou proudu. Sprchový oblouk se využívá pro svařování silných plechů, kde je požadován svar bez velkého převýšení s minimálním rozstříkem. Nevýhodou je velká tepelně ovlivněná oblast a deformace základního materiálu vlivem vneseného tepla.



Obr. 18 Sprchový oblouk [20]

- Pulzní oblouk – jedná se o bezzkratový přenos kovu do svarové lázně. Pravidelný cyklus je daný amplitudou impulsního proudu, jehož průběh je řízen elektronickou cestou. Základní funkcí elektrického proudu je udržení ionizovaného sloupce oblouku a jeho hodnoty jsou poměrně nízké, pouze od 20 do 50 A. Průběh proudu je řízen mikroprocesorem svařovacího zdroje. Frekvence impulsů se obecně pohybuje v rozmezí 25 až 500 Hz, výjimečně je možná frekvence až 1 kHz. Mezi hlavní přednosti pulzního oblouku je minimální rozstřík, nízké převýšení svarů, možnost použití u všech typů materiálů a nízké znečištění svaru.



Obr. 19 Pulzní oblouk [20]

U metody TIG se přídavný materiál vlivem tepla elektrického oblouku nataví a v podobě kapek se přenese do svarové lázně. Lze svařovat i bez přídavného materiálu místním ztavením základního materiálu. Výhodou tohoto svaru je zaručené stejné chemické složení jaké má základní materiál.



Obr. 20 Přenos kovu u metody TIG [21]

## 2.8 Elektrody pro svařování metodou TIG [6], [16]

U metody TIG se používají elektrody z čistého wolframu, ale mohou být použity i elektrody s příměsí thoria a zirconia, které lépe zapalují elektrický oblouk. Tyto příměsi mají také pozitivní vliv na stabilitu oblouku a proto jsou upřednostňovány.



**svařování stejnosměrným proudem, průměr méně než 3.2mm**



**elektroda o průměru 3.2mm a výše**



**svařování střídavým proudem všechny průměry**

Wolframové elektrody s příměsí 2 % thoria jsou vhodné pro svařování stejnosměrným proudem a wolframové elektrody s příměsí 2 % oxidu zirconia se používají pro svařování střídavým proudem, zejména pro svařování hliníku.

Před samotným svařováním je potřeba upravit konec elektrody zabroušením na brusce s kotoučem, který je vyroben z karbidu křemíku. Při broušení je nutné dbát na čistotu elektrody, aby nedošlo ke snížení teploty tavení a ke ztrátě její životnosti.

Obr. 21 Zabroušení konce elektrod [16]

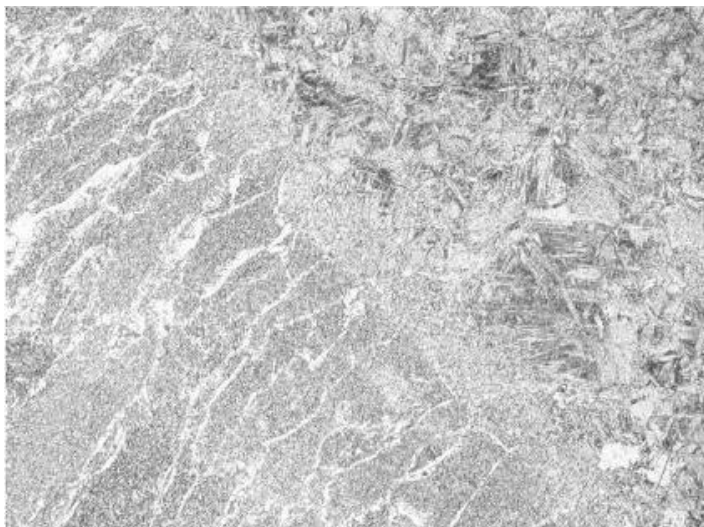
## 2.9 Metalurgické děje [4], [10]

Metalurgickými reakcemi rozumíme fyzikálně-chemické působení mezi ochrannou atmosférou, roztavenou struskou a svarovou lázní. Jedná se o krátkodobé reakce, které probíhají kontinuálně s vysokou intenzitou převážně na povrchu tavné lázně. Během reakcí je nutné chránit svarovou lázeň před škodlivými vlivy kyslíku a dusíku. K tomu slouží ochranná atmosféra inertního nebo aktivního plynu. Tuhnutí roztaveného kovu probíhá podobně jako u odlitků, kde nedochází k proudění tepla, je ovlivněno technologií svařování, množstvím vneseného tepla, základním materiálem a rozměry svaru. Plyny vzniklé při metalurgické reakci difundují do tepelně ovlivněné oblasti, kde mohou v případě rychlého ochlazení způsobit póry, zkřehnutí nebo trhliny.

Základní metalurgické děje: - oxidace svarového kovu

- redukční procesy manganu a křemíku
- dezoxidace FeO rozpuštěného ve svarové lázni
- odstraňování H, N, S, P ze svarové lázně
- legování svarového kovu

Látky potřebné k nastartování chemických reakcí jsou obsaženy v přídavném materiálu a tavidlech. Ke krystalizaci dochází při poklesu teploty pod teplotu tavení (liquidus), kde vlivem proměnných podmínek dochází k nerovnoměrnému růstu krystalů. Vlivem chemického složení



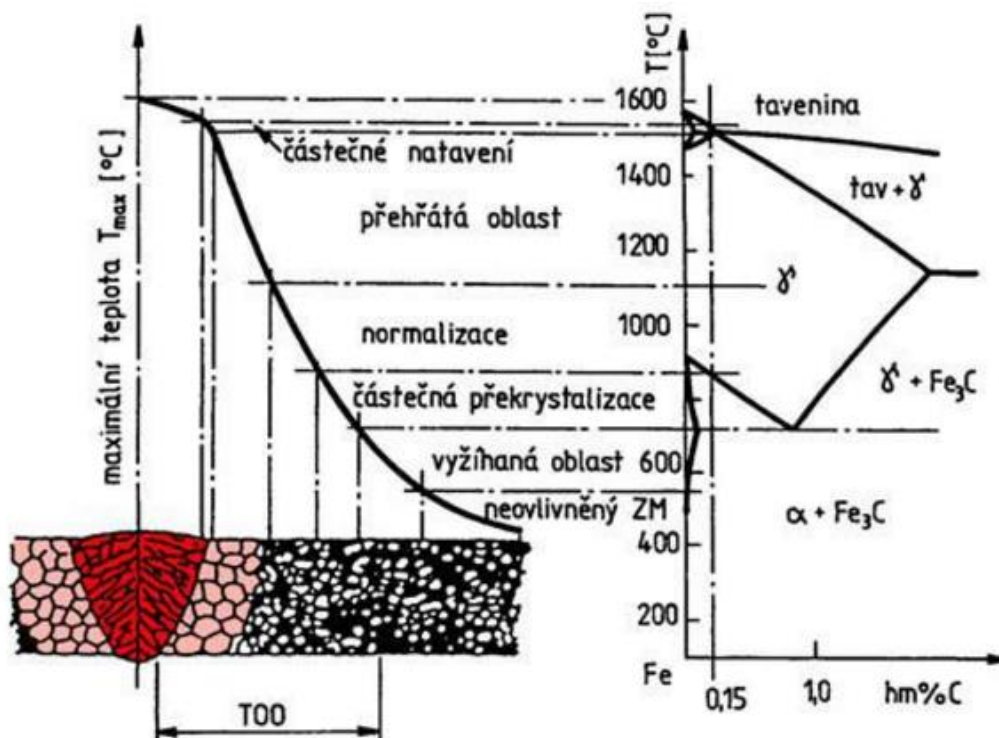
a rychlosti svařování tuhne tavenina buď dendriticky (při větším podchlazení), nebo celulárně (při menším podchlazení). Ve většině případů začíná krystalizace růstem dendritů a v pozdější fázi se změni na celulární.

Houževnatost svarového kovu je většinou menší než u základního materiálu a další vlastnosti jsou ovlivněny typem mikrostruktury, velikostí zrn, stárnutím atd.

Obr. 22 Přechod svarového kovu do TOO [19]

## 2.10 Tepelně ovlivněná oblast (TOO) [7]

Jedná se o oblast v okolí svarové housenky, kde dochází ke změnám struktury vlivem tepelného působení elektrického oblouku. Teplota klesá exponenciálně, od teploty svarové lázně, až po teplotu základního materiálu. Dochází k tepelnému zpracování, které se od běžného liší vysokou rychlostí ohřevu, krátkou prodlevou a vysokou rychlostí ochlazování. Závisí na tzv. teplotním gradientu ve svařovaném materiálu.



Obr. 23 Pásma TOO [7]



Tepelně ovlivněnou oblast lze rozdělit do pěti částí:

- Oblast přechodu svarového kovu do TOO, jedná se o hranici mezi svarovým kovem a základním materiálem
- Oblast přehřátí, oblast s hrubým zrnem ovlivněna teplotami nad  $Ac_3$ , u materiálů s vyšším obsahem uhlíku dochází k výraznému poklesu plastických vlastností z důvodu vzniku martenzitické struktury
- Oblast normalizace, oblast vyhřátá těsně nad teplotu  $Ac_3$ , ve které došlo k úplné polymorfní přeměně a k normalizačnímu žíhání, zrna jsou stejnoměrná
- Oblast částečné překrystalizace, nedošlo k úplné polymorfní přeměně perlitu a feritu, leží mezi teplotou  $Ac_3$  a  $Ac_1$
- Vyžíhaná oblast, rekrytalizační procesy do 500 °C, dále už jen změny v tuhém roztoku nebo substrukturální změny.

Rozměry jednotlivých částí tepelně ovlivněné oblasti se liší s ohledem na materiál a technologii použitou při svařování.

Tab. 1 Orientační šířky pásem TOO: [7]

Technologie svařování	Šířka TOO [mm]		
	nad $Ac_1$	nad $Ac_3$	přehřátá oblast
ROS	3 - 8	0,3 - 1	0,1 – 0,3
MAG	3 - 8	0,3 – 1	0,1 – 0,3
APT	3 – 15	0,3 – 2	0,1 – 0,5
Elektrostruskové	5 – 50	1 – 10	0,5 – 5
Elektronovým paprskem	0,3 – 1	0,1 – 0,3	0 – 0,1
Plazmou	0,3 - 1	0,1 - 0,3	0 – 0,1

### 3 Experimentální část

#### 3.1 Technologičnost součásti

Svařovaná součást bude svařována z plechů o tloušťce 1,5 a 3 mm. Vzhledem k malým rozměrům součásti a ke kusové výrobě bude použita ruční metoda TIG. Jako základní materiál je konstruktérem zadána ocel 12 050 (C45). Jako přídatný materiál bude použit nízkolegovaný drát OK AristoRod 13.12 s 1 % Cr a 0,5 % Mo. Tento přídatný materiál se primárně používá pro svařování MIG/MAG, ale díky jeho vlastnostem a vhodností pro svařování nízkolegovaných ocelí bude použit při našem experimentu.

Je potřeba spočítat uhlíkový ekvivalent a pokud bude mít vyšší hodnotu než 0,45hm. % bude potřeba součást před svařováním předežhřát.

#### 3.2 Rozbor materiálu 12 050 (C45) [11]

Jedná se o nejpoužívanější uhlíkovou ocel vhodnou k povrchovému kalení a zušlechťování. Tato ocel je velmi dobře obrobitelná, má dobrou tvarovou stabilitu po tepelném zpracování, avšak špatně svařitelná z důvodu vysokého obsahu uhlíku. Vyšší obsah uhlíku v oceli způsobuje rychlejší chladnutí, což vede k většímu vzniku martenzitu ve struktuře svaru a vyšší tvrdosti.

Tab.2 Chemické složení v %: [11]

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
dle ČSN	0,42-0,5	0,5-0,8	0,17-0,37	max 0,25	max 0,3	max 0,3	max 0,04	max 0,04

Tab. 3 Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 2050: [11]

Materiál			12 050 (C45)
Mez kluzu	Rp0,2	MPa	min 325
Mez pevnosti	Rm	MPa	min 540
Tažnost	A5	%	min 17
Tvrdość		HB	max 225
Modul pružnosti v tahu	E	GPa	211
Modul pružnosti ve smyku	G	GPa	79



Obr. 24 Výchozí struktura oceli C45

### 3.3 Uhlíkový ekvivalent [7]

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} = 0,46 + \frac{0,25+0+0}{5} + \frac{0,3+0}{15} = 0,53 \text{ hm. \%}$$
 (3.1)

kde CE představuje uhlíkový ekvivalent a obsahy jednotlivých prvků jsou uvedeny v hm. %

$CE > 0,45 \text{ hm. \%}$ , není splněna podmínka dobré svařitelnosti. Je nutné materiál před svařováním předehřát.

### 3.4 Teplota předehřevu [7]

$$Tp = 350 \cdot \sqrt{(c_p - 0,25)} = 350 \cdot \sqrt{(0,581 - 0,25)} = 201,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$
 (3.2)

$$\text{kde } c_p = c_c + 0,005 \cdot s \cdot c_c = 0,5767 + 0,005 \cdot 1,5 \cdot 0,5767 = 0,581$$
 (3.3)

$$\text{kde } c_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} = \frac{360 \cdot 0,46 + 40 \cdot (0,65 + 0,25) + 20 \cdot 0,3 + 28 \cdot 0}{360} = 0,5767$$
 (3.4)

kde  $T_p$  představuje teplotu předehřevu,  $c_p$  koeficient praskavosti,  $c_c$  koeficient vlivu uhlíku, obsahy jednotlivých prvků jsou uvedeny v hm. %

Z výpočtu je zřejmé, že ideální teplota, na kterou je potřeba materiál před svařováním předehřát, je  $201,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z důvodu zjednodušení budeme materiál předehřívat na teplotu  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tab. 4 Parametry svařování jednotlivých vzorků:

Číslo vzorku	I [A]	Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Ochranný [l/min]	Doba [min]	Doba [min]	Doba [s]
1	50	-	8	-	30	15-20
2	40	-	8	-	30	15-20
3	40	200	8	15	30	15-20
4	40	200	8	15	30	15-20

### 3.5 Příprava metalografického vzorku [2], [23]

- Odběr vzorku – všechny 4 vzorky byly odebrány na metalografické pile LABOTOM 5 od výrobce STRUERS. Pro odběr bylo zvoleno místo nejbližší k počátku svaru z důvodu dostatečné velikosti vzorku a také z možného výskytu vad počátku svarové housenky. Při odběru vzorků bylo nutné dbát na to, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění oblasti řezu, které by mohlo ovlivnit výslednou strukturu.
- Preparace vzorku – vzhledem k velikosti našich vzorků, které mají 10-15 mm, by bylo nebezpečné provádět výbrus ručně, a tudíž jsme se rozhodli ho zalisovat za tepla do plastu. Byl použit programovatelný automatický elektro-hydraulický lis ECOPRESS 100 od výrobce METKON. K zalisování byla použita průhledná plastová hmota ve formě prášku, která se před zalisováním nasypala rovnoměrně kolem vzorků, které byly zalisovány po dvou. Hodnoty nastavené na přístroji jsou shrnuty v následující tabulce:

Tab. 5 Parametry pro zalisování vzorku:

Teplota ohřevu	Tlak	Čas výdrže	Teplota po ochlazení
[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[bar]	[min]	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
200	240	3	30

Po vyjmutí výlisku je potřeba srazit hrany, aby nedošlo k poškození kotoučů při broušení. V našem případě jsme hrany sráželi na pomaloběžné brusce FERM. Vhodné je také popsat vzorky pomocí vibračního popisovače, aby nedošlo k záměně vzorků.

c) Broušení vzorku – broušením se snažíme minimalizovat nerovnosti, které vznikly na povrchu vzorku při jeho odběru. Při broušení postupujeme od nejhrubších kotoučů po nejjemnější. Před broušením na jemnějším kotouči je nutné vzorek opláchnout, aby se odstranily zrnka brusiva, které by mohly znehodnotit jak vzorek, tak i jemnější kotouč. Kotouče je nutné chladit. Po broušení na hrubých kotoučích se vzorek oplachuje pouze vodou, kdežto u jemnějších se používá směs technického lihu a benzínu. K broušení byl použit stroj LABOPOL 5 od výrobce STRUERS, ke kterému byl připojen dávkovač chladicí emulze LABODOSER od stejného výrobce. Parametry broušení našich vzorků jsou shrnuty v následující tabulce:

Tab. 6 Souhrn podmínek při broušení vzorků:

Zrnitost kotouče	Číslo vzorku				Otáčky	Čas broušení	Použitá brousící emulze
	1	2	3	4			
	Počet broušení				[ot/min]	[min]	
220	3	3	3	3	300	5	-
1 200	2	2	2	2	300	5	-
9 μ	1	1	1	1	150	5	diamant
3 μ	1	1	2	2	150	5, 3	diamant
1 μ	1	1	2	2	150	4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

d) Leptání vzorku – slouží ke zviditelnění mikrostruktury. U leptání je možné použít více metod v závislosti na konkrétních požadavcích pro následné pozorování a na druhu materiálu. Rozlišujeme chemické leptání, leptání na hranice zrn, plošné leptání, selektivní leptání, elektrolytické a tepelné leptání.

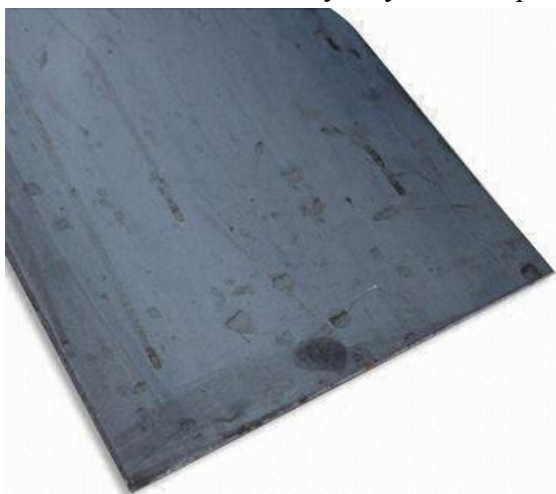
Pro naše potřeby postačí chemické leptání, kdy vzorek na krátkou chvíli namočíme do leptadla, v našem případě Nital (3 % roztok kyseliny dusičné v methanolu), poté opláchneme lihem. Leptadlo začne napadat měkké fáze na hranicích zrn a zviditelní tak strukturu. Po naleptání máme jen pár minut na pozorování struktury pod mikroskopem, než se začnou projevovat zárodky koroze.



### 3.6 Vyhodnocení svařovaných vzorků [16], [18]

- Tloušťka oxidů na povrchu základního materiálu

Svařovaná součást byla vyrobena z plechu, který byl válcovaný za tepla, na jehož povrchu se nachází vrstva oxidů železa (okuje) zaválcovaných do základního materiálu. Tyto oxidy tvoří tvrdou vrstvu, která se při svařování rozpustí pouze částečně do svarového kovu vlivem přídavného materiálu. Nerozpuštěné oxidy vyplouvají na povrch svarové lázně a po ztuhnutí vytvoří strusku.



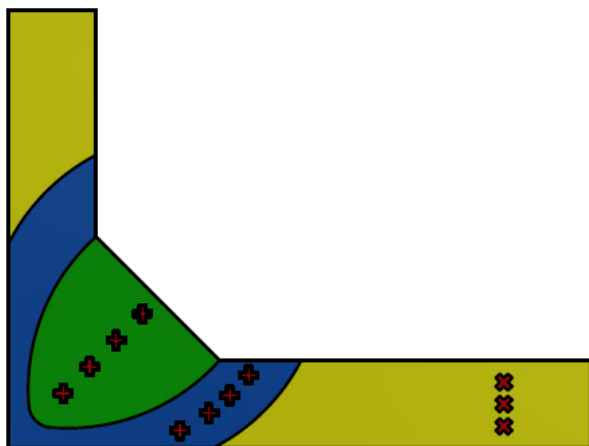
Obr. 25 Plech válcovaný za tepla

Tab. 7 Tloušťka oxidů na povrchu základního materiálu:

Číslo plechu	Tloušťka vrstvy oxidů [μm]					
1	10	8	10	15	12	12
2	15	16	12	10	12	15

- Měření tvrdosti vzorků

Při měření tvrdosti podle Vickerse bylo uvažováno zatížení HV5. Toto zatížení odpovídá síle závaží o hmotnosti 5 kg, které se pozvolna vmáčklo do materiálu a po 15 s prodlevě se vrátilo do původní polohy. Měření proběhlo na zařízení Zwick 3212 a vyhodnocení pomocí programu TestXpert Master od společnosti Zwick Roell. Měření bylo provedeno 4x pro oblast svaru a tepelně ovlivněnou oblast (TOO) a 3x pro základní materiál, který byl



u všech součástí stejný až na vzorek č.3. U třetího vzorku byla naměřená tvrdost o 10-20 HV nižší. Může to být způsobeno místem měření, které mohlo být dále od svaru a nedošlo k ovlivnění struktury vlivem předehřevu a procesem svařování. Může to také poukazovat na použití jiného plechu při výrobě polotovaru.

Obr. 26 Schéma měření tvrdosti

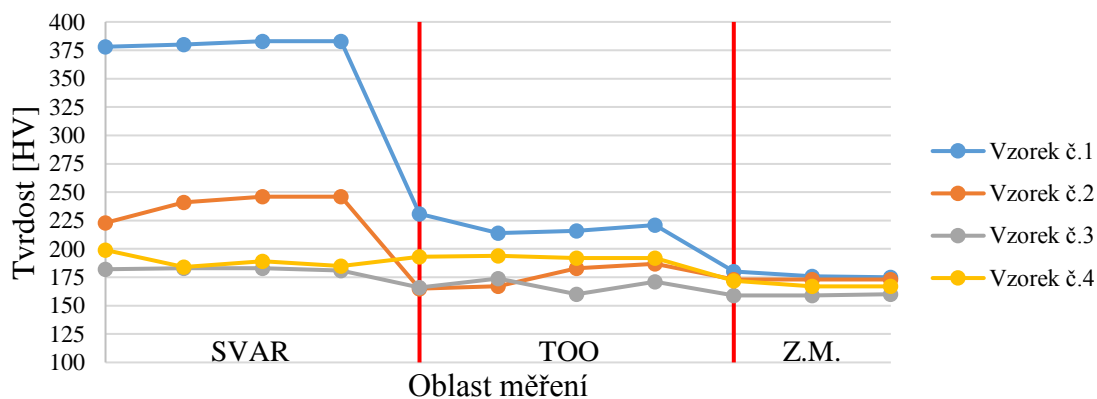
Tab. 8 Tabulka naměřených tvrdostí:

Číslo vzorku	Tvrdost [HV]		
	Svar	TOO	Základní materiál
1	378	231	180
	380	214	176
	383	216	175
	383	221	-
2	223	165	173
	241	167	173
	246	183	173
	246	187	-
3	182	166	159
	183	174	159
	183	160	160
	181	171	-
4	199	193	172
	184	194	167
	189	192	167
	185	192	-

Naměřená tvrdost je největší ve svaru a postupně směrem k základnímu materiálu klesá. Vzorky, které byly vyrobeny bez předehřevu, mají daleko vyšší tvrdost než vzorky vyrobené s předehřevem, což ukazuje na vyšší vznik martenzitu. Dle WPS je maximální přípustná hodnota tvrdosti při svařování 350 HV. Tuto hranici překročil vzorek č.1, svařovaný bez předehřevu se svařovacím proudem  $I=50$  A. Pokud by nedošlo ke snížení tvrdosti popouštěním, mohlo by dojít ke vzniku dalších mechanismů poškození svarového spoje, jako je například korozní praskání pod napětím. U čtvrtého vzorku je vyšší hodnota tvrdosti v TOO. Tahle odchylka u třetího vzorku může být způsobena měřením blíže k oblasti svarového kovu.

Odchytky v naměřených hodnotách u jednotlivých vzorků mohou být způsobeny rozdílnou tvrdostí zrn ve feriticko-perlitické struktuře.

Graf tvrdosti jednotlivých vzorků



Obr. 27 Graf tvrdosti jednotlivých vzorků

- Vzorek č.1

Na svaru je patrný souvislý zápal o hloubce 0,25 mm (jedná se o částečné vytavení základního materiálu), na začátku svaru studený spoj. Příčinou zápalu může být příliš velký svařovací proud, příliš dlouhý oblouk nebo použití nevhodné elektrody. Studený spoj vzniká vlivem nesprávného vedení elektrody, případně vysokou svařovací rychlostí.

Patrná je tvorba strusky vzniklá oxidací základního materiálu a také vyplavené oxidy vzniklé u základního materiálu vlivem tepelného válcování. (obr.30) Kořen svaru je málo provařený,

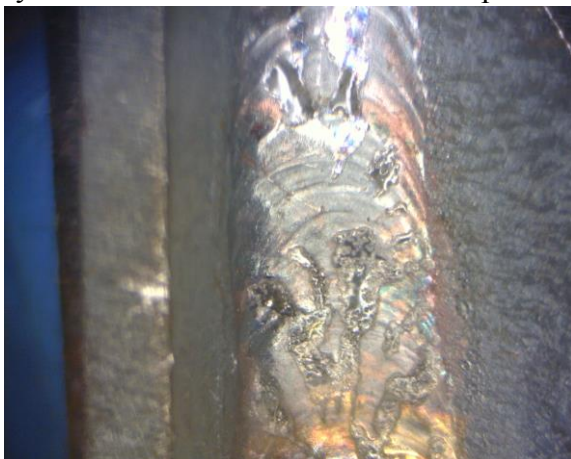


a došlo také ke značnému ztenčení stěny základního materiálu vlivem zápalu (obr.29). Neprovařený kořen vzniká vlivem vysoké rychlosti svařování, příliš malé mezery mezi svařovanými díly nebo nevhodným vedením elektrody. Svařované součásti svírají úhel 88° (viz příloha). Šířka tepelně ovlivněné oblasti u tohoto vzorku je přibližně 1,2 mm.

Svar je nadměrně asymetrický, příčinou může být špatný úhel hořáku nebo nevhodný pohyb hořáku.

Obr. 28 Vzorek č.1

Po naleptání vynikla perliticko-feritická struktura svarového kovu a široká tepelně ovlivněná oblast, kterou tvoří perlitická struktura s feritickým síťovým. Z tohoto síťový proniká ferit do perlitu v podobě Widmannstättenova feritu (obr.32), který je ve svarové oblasti nežádoucí a je způsoben vyšší ochlazovací rychlostí a hrubnutím zrna v tepelně



Obr. 29 Vzorek č.1 před naleptáním

ovlivněné oblasti. Ve struktuře svarového kovu jsou patrné struskové vměstky. Výrazná jehlicovitá struktura svarového kovu může poukazovat na vznik tvrdé martenzitické struktury. (obr.31)

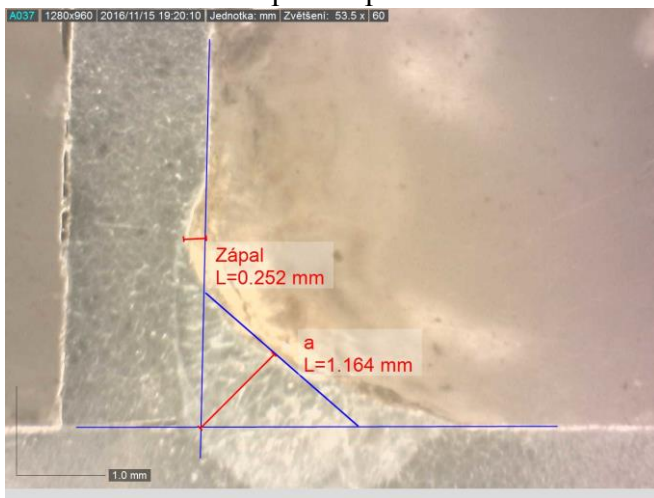
Obr. 30 Struska na povrchu svaru u vzorku č.1



Obr. 31 Vzorek č.1 po naleptání



Obr. 32 Widmannstättenova struktura



Obr. 33 Rozměry svaru u vzorku č.1

- Vzorek č.2

Povrch svaru je čistý, k částečnému vyplavení strusky došlo v malé míře až na konci svarové housenky. V okolí svaru je patrný malý rozstřík kovu (obr.34), jehož příčinou může být příliš velký svařovací proud, dlouhý oblouk, nesprávná polarita nebo nečistoty na svarových hranách. Kořen je dostatečně provařený. Na hranici mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí se vyskytuje nežádoucí Widmannstättenova struktura. Ve struktuře svarového kovu jsou patrné drobné bublinky a oxidické vměstky. Výrazná jehlicovitá struktura značí výskyt martenzitu. (obr.37 a 38)



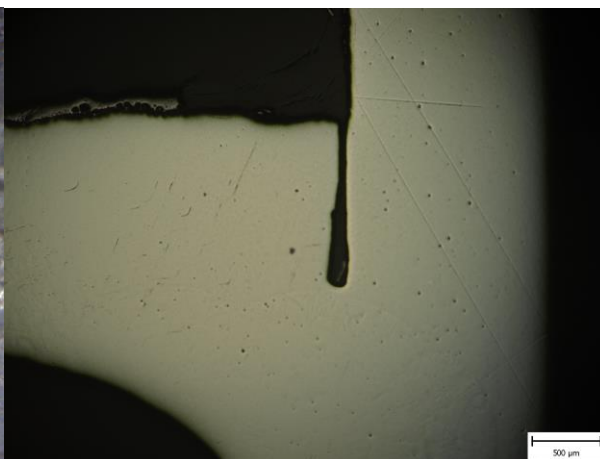
Obr. 34 Vzorek č.2



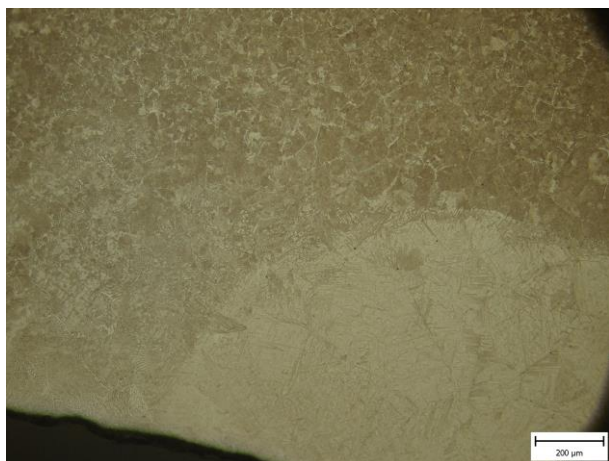
Základní materiál svírá po svaření úhel  $89,17^\circ$  a šířka tepelně ovlivněné oblasti je přibližně 1,5 mm (viz příloha). Koutový svar je poměrně symetrický.



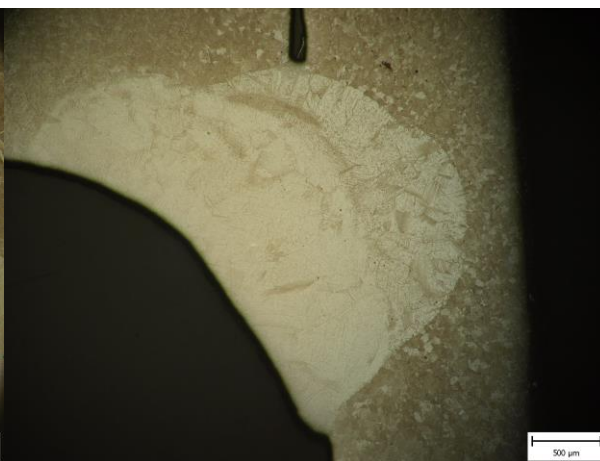
Obr. 35 Povrch svaru na vzorku č.2



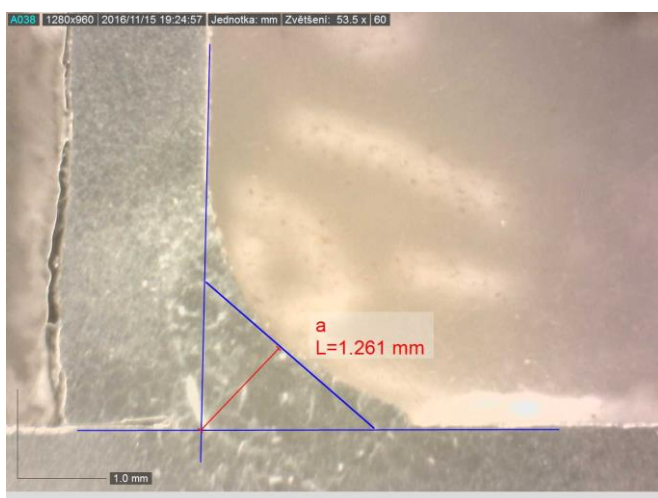
Obr. 36 Vzorek č.2 před naleptáním



Obr. 37 Hranice svarového kovu a TOO



Obr. 38 Vzorek č.2 po naleptání



Obr. 39 Rozměry svaru u vzorku č.2

- Vzorek č.3

Okolí svaru je značně poničené vlivem spálených okují, které vznikly při přehřevu. Na povrchu svarové housenky je velké množství vyplavené strusky. Na začátku svaru vznikl studený spoj. A podél celé délky svaru je patrný zápal, který měl v místě řezu 0,15 mm. Z hlediska provaření svaru jsou plechy u vzorku č.3 spojeny dobře. Je patrné velké provaření



Obr. 40 Vzorek č.3

do základního materiálu. (obr.43) Svařované plechy svírají úhel  $86,88^\circ$  a tloušťka tepelně ovlivněné oblasti v místě měření je přibližně 1,5mm. Jde vidět nadměrná asymetrie koutového svaru.

Po naleptání vynikla podstatně jemnější struktura než u předchozích vzorků, je to způsobeno přehřevem, a dva větší



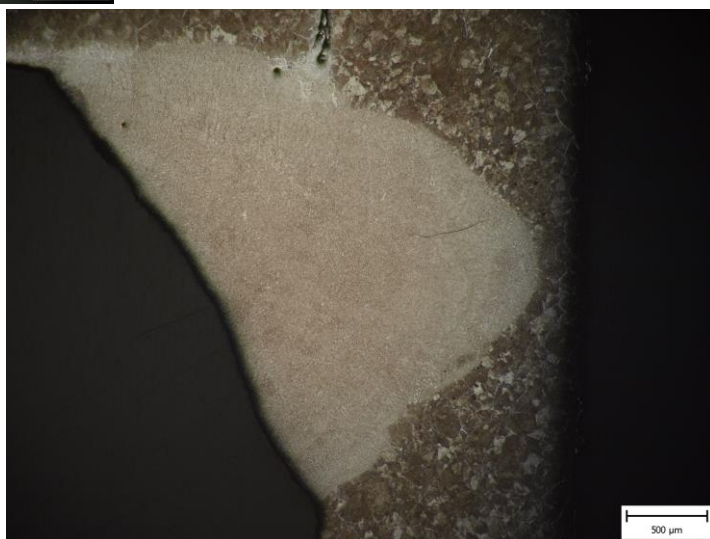
Obr. 41 Povrch svaru na vzorku č.3



Obr. 42 Vzorek č.3 před naleptáním

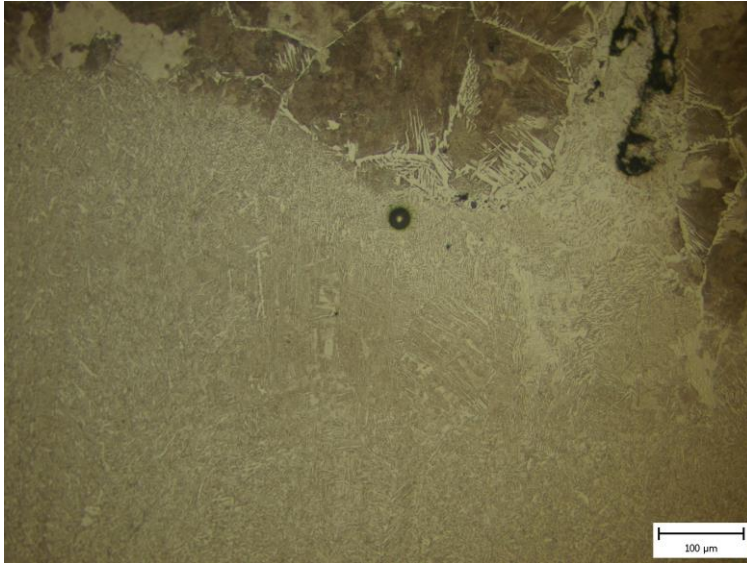
póry ve svarovém kovu, (obr.44) jejich příčinou mohou být nečistoty na povrchu svařovaného materiálu, vlhká elektroda,

vysoká rychlost svařování nebo rychlé chladnutí lázně vlivem nízkého svařovacího proudu. Větší pór má průměr cca  $28\text{ }\mu\text{m}$ . Na rozhraní svarového kovu je vidět Widmannstättenova struktura. V oblasti svarového kovu se nachází malá trhlinka o délce cca  $400\text{ }\mu\text{m}$ . (obr.45) Jedná se tzv. horkou trhlinu, která vzniká převážně ve svarovém kovu vlivem krystalizačního procesu v těsně podsolidusových teplotách.

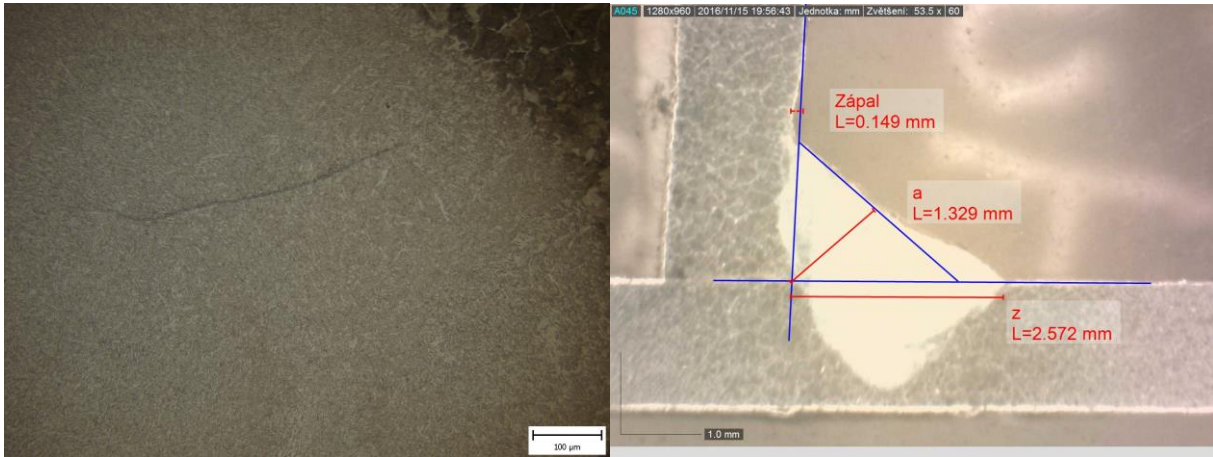


Obr. 43 Vzorek č.3 po naleptání





Obr. 44 Detail póru a rozhraní svarového kovu s TOO



Obr. 45 Detail horké trhliny u vzorku č.3

Obr. 46 Rozměry svaru u vzorku č.3

- Vzorek č.4

Poníčení okolí svaru vlivem předehřevu je méně výrazné než u vzorku č.3. Začátek svaru není téměř vůbec provařený. (obr.47) Na povrchu svarové housenky je velké množství vyplavených oxidů. (obr.48) Kořen, a celkově celý svar, je proveden správně. Podél svaru není téměř žádný zápal a svar je poměrně symetrický. Po naleptání je ve svarovém kovu vidět řada nečistot, oxidických vměstků a menší výskyt Widmannstättenovy struktury na rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Struktura svarového kovu je jemná, což značí menší výskyt tvrdé struktury martenzitu. (obr. 50)

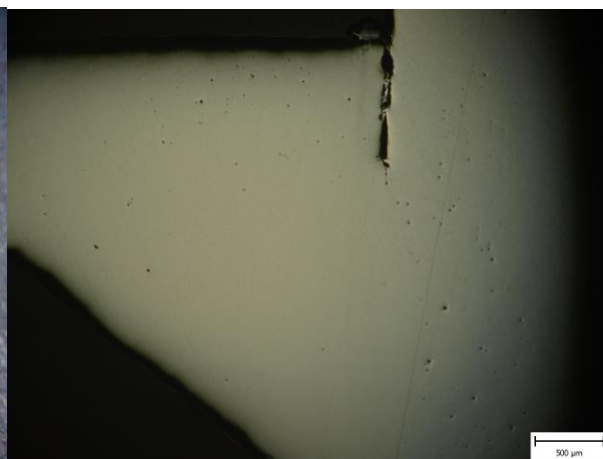


Obr. 47 Vzorek č.4

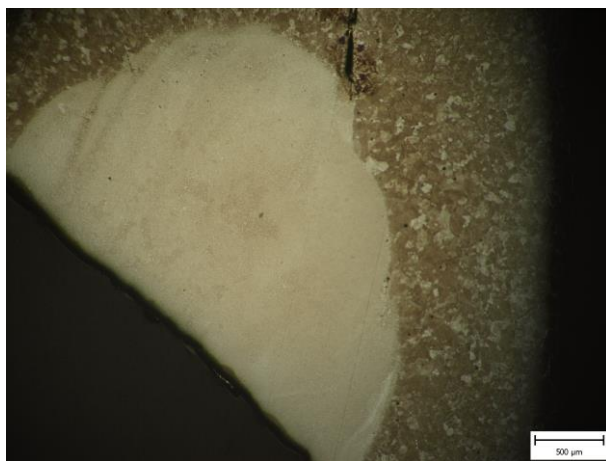
Po svaření svírají součásti úhel  $90,85^\circ$  a šířka tepelně ovlivněné oblasti je přibližně 1,2 mm. Je patrné velké provaření základního materiálu, a to kolem 1 mm.



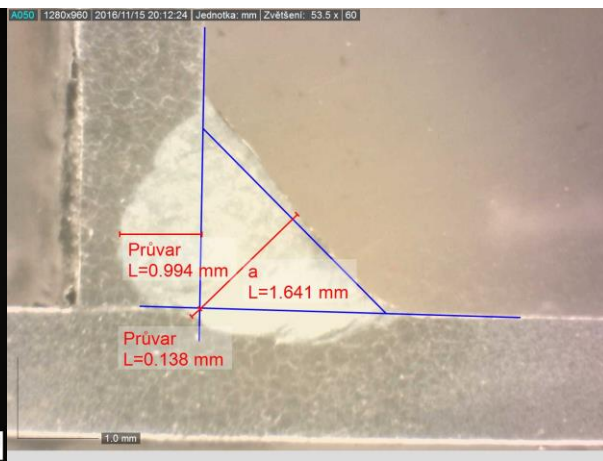
Obr. 48 Povrch svaru na vzorku č.4



Obr. 49 Vzorek č.4 před naleptáním



Obr. 50 Vzorek č.4 po naleptání



Obr. 51 Rozměry svaru u vzorku č.4



## 4 Závěr

Daná součást je nejlépe svařitelná metodou TIG, při použití ochranné atmosféry argonu. Z navržených parametrů, jsou nejvhodnější u vzorku č.3 a 4:

Tab.9 Nejvhodnější parametry pro svařování:

Číslo vzorku	I	Teplota předehřevu	Ochranný plyn - Ar	Doba předehřevu	Doba chlazení	Doba svařování
	[A]	[°C]	[l/min]	[min]	[min]	[s]
3 a 4	40	200	8	15	30	15-20

U vzorku č. 1 a 2, které jsou svařovány bez předehřevu vzniká ve svarovém kovu struktura s vysokou tvrdostí. Na rozhraní mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí je zvýšený výskyt tzv. Widmannstättenovy struktury, která se vytváří vlivem rychlého ochlazování a hrubnutím zrna v tepelně ovlivněné oblasti, při kterém proniká ferit do perlitu v podobě jehlic. Tato struktura se obvykle vyskytuje u ocelí s vyšším obsahem uhlíku, může být jednou z příčin vzniku trhlin a je proto nežádoucí. Způsobuje také výrazné snížení mechanických vlastností.

Vlivem předehřevu došlo ke zjemnění struktury svarového kovu a snížení výsledné tvrdosti. Pro výraznější snížení tvrdosti bych po svařování doporučil normalizační žihání s ohřevem na 820-850°, dlouhou výdrž a pozvolným ochlazením v peci. Případně žihání ke snížení vnitřního napětí.

Všechny součásti mají vzhledem k rozměrům dostatečně provařený kořen. U vzorku č.1 je provaření menší než u ostatních, ale při předpokládaném namáhání součásti je provaření dostačující. Provaření lze ovlivnit rychlostí svařování, velikostí styčné mezery a také velikostí svařovacích parametrů. Na povrchu většiny svarů se nachází vyplavená struska, která je tvořena zbytky povrchových oxidů vzniklých vlivem tepelného válcování plechu, u které nedošlo k rozpuštění do svarové lázně pomocí přídavného materiálu. Vzniku strusky na povrchu svaru lze zabránit očištěním základního materiálu. Po obroušení oxidů se výrazně zvýší kvalita povrchu svarového spoje. U vzorků č. 1 a 3 je patrný zápal po celé délce svaru vzniklý vysokou svařovací rychlostí nebo špatným vedením hořáku. Tyto vzorky mají také nadměrně asymetrické svary, tato vada vzniká špatným úhlem a nevhodným vedením hořáku. Úhel svařovaných dílců je v rozmezí 86,878° až 90,847°, výška svaru je v rozmezí a=1,164-1,641 mm a šířka tepelně ovlivněné oblasti je v rozmezí 1,203 až 1,488 mm.

Na vzorku č.3 jsou patrné 2 velké póry vzniklé oxidací základního materiálu a příliš velkou svařovací rychlostí. Dále můžeme pozorovat jednu tzv. horkou trhlínu o délce cca 400 μm, která vznikla ve svarovém kovu vlivem krystalizačního procesu v těsně podsolidusových teplotách.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BLAHUTA, Ladislav. *Zdroje proudu pro svařování elektrickým obloukem I.* [online]. Havířov [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/13000804-Mgr-ladislav-blahuta.html>
2. CAIS, Jaromír. *Elektronová mikroskopie. Metalografie* [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/1571274-Elektronova-mikroskopie-metalografie.html>
3. *Fronius International GmbH* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-5763834B-15D7A356/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/29\\_3911.htm#.WSKzROuLTBQ](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-5763834B-15D7A356/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3911.htm#.WSKzROuLTBQ)
4. GLADILIN, A. N. a N.P. DUBININ. *Technologie kovů: Díl II. - SLÉVÁNÍ, TVÁŘENÍ SVAŘOVÁNÍ.* Praha: SNTL, 1955.
5. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování.* 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 8070826975.
6. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II. - svařování* [online]. Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2006 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
7. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů.* 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 8085771853.
8. MIG /MAG svařování. In: *Automig* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/>
9. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení.* Ostrava: Zeross, 1999. ISBN 80-85771-70-5.
10. NĚMEC, Josef. *Fyzikální a metalurgické základy obloukového sváření.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977.
11. *Ocel 12 050.* ÚST VUT Brno. Brno, 6 s. Dostupné také z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze\\_modelu\\_soubory/ocel\\_12050.3.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/ocel_12050.3.pdf)
12. OK AristoRod 13.12. In: *ESAB* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410907&tab=1>
13. OK Tigrod 12.61. In: *ESAB* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410339>
14. Picotig 180. In: *EWM Group* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.ewm-group.cz/picotig-180/>
15. Pinch effect. In: *Wikipedia* [online]. 2010 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Welding-pincheffect.svg>

16. *Průručka svářeče: Pro svařování v ochranné atmosféře a tepelné dělení plamenem* [online]. Děčín [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: [http://www.airproducts.cz/~media/Files/PDF/industries/metals/CZ\\_Priruckasvarece.pdf?la=cs-CZ](http://www.airproducts.cz/~media/Files/PDF/industries/metals/CZ_Priruckasvarece.pdf?la=cs-CZ)
17. SEDLÁČEK, Lukáš. *KURS průvarového bodového svařování elektrickým obloukem s obalenou elektrodou D-E9* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/1971887/>
18. SCHMIDOVÁ, Eva. *Metalurgické vady svarových spojů*. Druhé. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-851-0.
19. *Strojárstvo/Strojrenství: Engineering magazine* [online]. Žilina: MEDIA/ST [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/strojarsstvo-extra/1750-hodnoceni-vlastnosti-svarovych-spoj-pomoci-metody-malych-vzork>
20. Svařování elektrickým obloukem. *ELUC* [online]. Olomouc, 2014 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1806>
21. Svařování TIG WIG. In: *BV Group* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.bvgroup.cz/svarovani-tig-wig.php>
22. *Svařování.cz* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.svarovani.cz/cs/m-3-ostatni-svarecky-a-prislusenstvi/>
23. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. Olomouc [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
24. TPS 270i C Pulse. In: *The Fabricator* [online]. 2015 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/product/arcwelding/compact-welding-machines-handle-gmaw-gtaw>
25. Welding helmet pros. In: *Welding Helmet Pros* [online]. 2015 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://weldinghelmetpros.com/cool-welding-projects-you-can-do-at-home/5>
26. Welding types. In: *Welding Types* [online]. 2011 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.weldingtypes.net/category/tig-welding/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
CE	Uhlíkový ekvivalent	[hm.%]
T <sub>p</sub>	Teplota předehřevu	[°C]
c <sub>p</sub>	Koeficient praskavosti	[%]
c <sub>c</sub>	Koeficient vlivu uhlíku	[%]
s	Tloušťka materiálu	[mm]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařování malých součástí	9
Obr. 2 Svařování metodou TIG	9
Obr. 3 Vyráběná součást	10
Obr. 4 Umístění součásti v mechanismu	10
Obr. 5 Rozměry součásti	10
Obr. 6 Znázornění elektrického oblouku	11
Obr. 7 Statické charakteristiky elektrického oblouku	12
Obr. 8 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku	12
Obr. 9 Znázornění MIG/MAG pracoviště	13
Obr. 10 Znázornění TIG/WIG pracoviště	14
Obr. 11 Svařovací drát MIG/MAG (OK Aristorod 13.12)	15
Obr. 12 Svařovací drát WIG/TIG (OK Tigrod 12.61)	15
Obr. 13 Svařovací invertor MIG/MAG	16
Obr. 14 Svařovací invertor Picotig 180	16
Obr. 15 Systém oddělení kapky	17
Obr. 16 Krátký zkratový oblouk	17
Obr. 17 Přechodový oblouk	18
Obr. 18 Sprchový oblouk	18
Obr. 19 Pulzní oblouk	18
Obr. 20 Přenos kovu u metody TIG	19
Obr. 21 Zabroušení konce elektrod	19
Obr. 22 Přechod svarového kovu do TOO	20
Obr. 23 Pásma TOO	20
Obr. 24 Výchozí struktura oceli C45	22
Obr. 25 Plech válcovaný za tepla	25
Obr. 26 Schéma měření tvrdosti	25
Obr. 27 Graf tvrdosti jednotlivých vzorků	26
Obr. 28 Vzorek č.1	27
Obr. 29 Vzorek č.1 před naleptáním	27
Obr. 30 Struska na povrchu svaru u vzorku č.1	27
Obr. 31 Vzorek č.1 po naleptání	28
Obr. 32 Widmannstättenova struktura	28
Obr. 33 Rozměry svaru u vzorku č.1	28
Obr. 34 Vzorek č.2	28
Obr. 35 Povrch svaru na vzorku č.2	29
Obr. 36 Vzorek č.2 před naleptáním	29
Obr. 37 Hranice svarového kovu a TOO	29
Obr. 38 Vzorek č.2 po naleptání	29
Obr. 39 Rozměry svaru u vzorku č.2	29
Obr. 40 Vzorek č.3	30
Obr. 41 Povrch svaru na vzorku č.3	30
Obr. 42 Vzorek č.3 před naleptáním	30
Obr. 43 Vzorek č.3 po naleptání	30
Obr. 44 Detail póru a rozhraní svarového kovu s TOO	31
Obr. 45 Detail horké trhliny u vzorku č.3	31
Obr. 46 Rozměry svaru u vzorku č.3	31
Obr. 47 Vzorek č.4	31

Obr. 48 Povrch svaru na vzorku č.4	32
Obr. 49 Vzorek č.4 před naleptáním	32
Obr. 50 Vzorek č.4 po naleptání	32
Obr. 51 Rozměry svaru u vzorku č.4	32

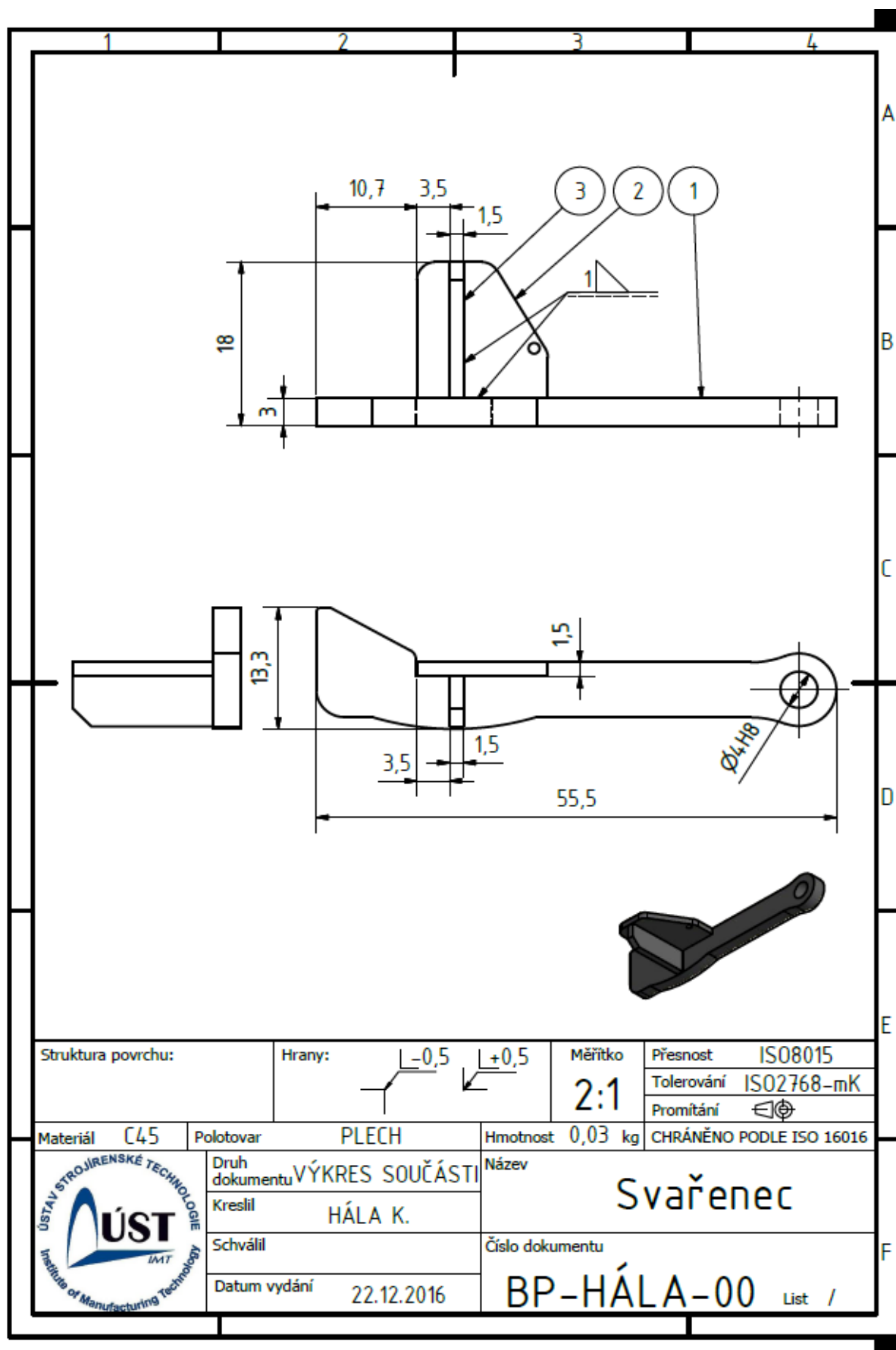
## **SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Orientační šířky pásem TOO	21
Tab. 2 Chemické složení v %	22
Tab. 3 Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 2050	22
Tab. 4 Parametry svařování jednotlivých vzorků	23
Tab. 5 Parametry pro zalisování vzorku	23
Tab. 6 Souhrn podmínek při broušení vzorků	24
Tab. 7 Tloušťka oxidu na povrchu základního materiálu	25
Tab. 8 Tabulka naměřených tvrdostí	26
Tab. 9 Nejvhodnější parametry pro svařování	33

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Výkres svařované součásti
Příloha 2	Informace o přídavném materiálu
Příloha 3	Další foto vzorků

Příloha 1





# OK AristoRod 13.12

SFA/AWS A 5.28: ER 80S-G  
EN ISO 21592-A: G CrMo1Si  
GOST 2246: 08X CM A

## Použití:

Nízkolegovaný drát s 1% Cr, 0.5% Mo pro svařování žárovevých a nízkolegovaných ocelí s vyšší pevností s pracovní teplotou do 450°C.

Interpass teplota 150 - 300 °C  
Předehřev 150 - 300 °C pro C1  
Předehřev 220 - 250 °C pro M21

## Vhodnost pro svařování, např.:

13CrMo 4-5, G17CrMo5-5 25CrMo4 a jiné

## Klasifikace, certifikace:

TÜV 10089

## Ochranný plyn (EN439):

M21, C1

## Svařovací proud:

— (+)

## Typické chemické složení drátu (%):

C	Si	Mn	Cr	Mo
0,10	0,60	1,00	1,10	0,50

## Polohy svařování:



## Jiné údaje:

W.Nr. 1.7339

**C**

## Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

Podmínky	Stav	Plyn	Tepl. zk. °C	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0,2</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	KV (J)/°C			(-HB)
							+20	0	-20	
EN	TZ 0	M21	+20	785	670	18	40	30	25	270
EN	TZ 0	M21	+450	760	605	15				
EN	TZ 1	M21	+20	580	450	24	87	40	30	190
EN	TZ 1	M21	+450	500	390	17				
EN	TZ 2	M21	+20	460	320	35	115	60	30	140
EN	TZ 2	M21	+450	410	210	25				

TZ 0 - stav po svařování, TZ 1 - stav po žhání 700°C/0,5 h, TZ 2 - stav po TZ 940°C + 730°C/15h.

## Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:

Ø d (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výlet drátu (mm)	Spotřeba plynu (l/min)	Rychlost podávání (m/min)	Výkon svařování (kg/h)
0,8	40 - 170	16 - 22	10	12	2,0 - 10,8	0,4 - 2,6
1,0	80 - 280	18 - 28	15	15	2,7 - 14,7	1,0 - 5,4
1,2	120 - 350	20 - 33	20	18	2,7 - 12,4	1,5 - 6,6
1,6	225 - 480	26 - 38	30	20	3,1 - 8,1	3,3 - 11,6

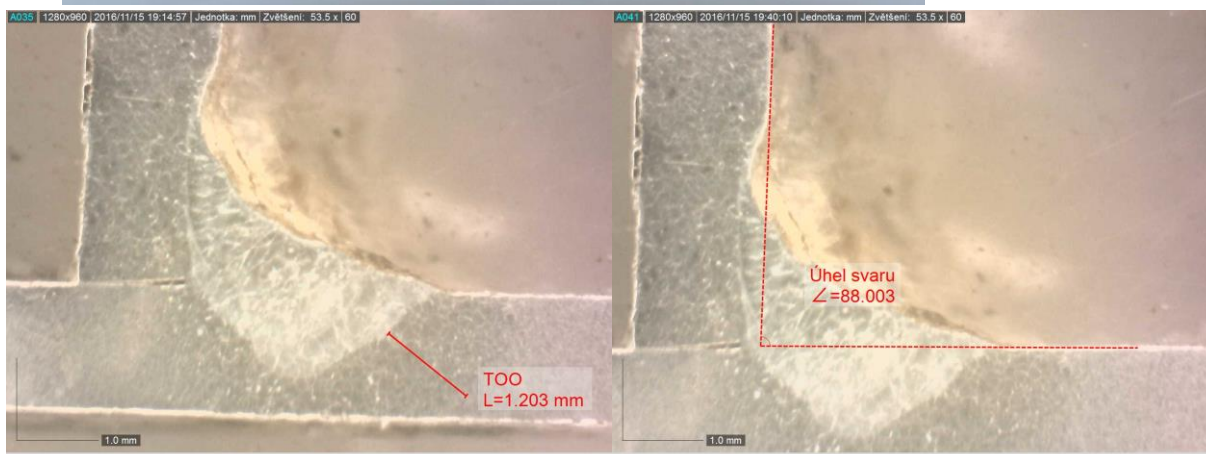
## Balení:

Ø (mm)	cívka	hmotnost (kg)
0,8	77-0	15
1,0	77-1	18
1,2	77-1	18
1,6	77-1	18

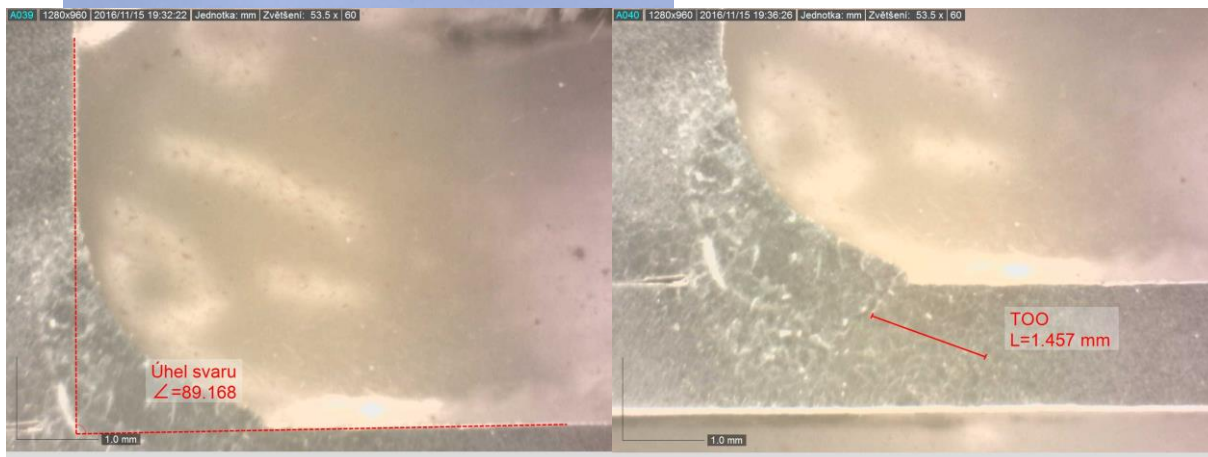


### Příloha 3

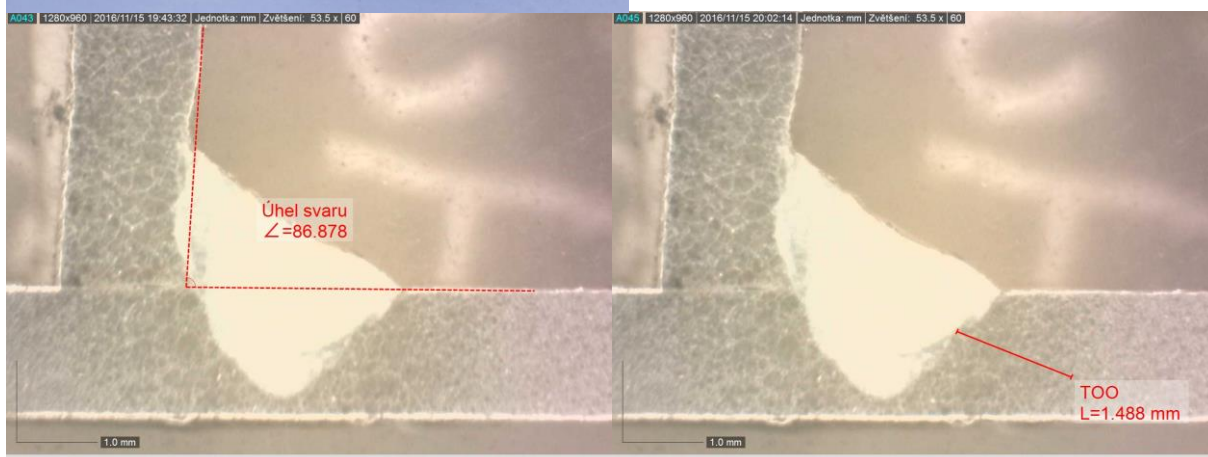
- Vzorek č.1



- Vzorek č.2



- Vzorek č.3



- Vzorek č.4

